



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ Übersetzung der  
europäischen Patentschrift

⑧7 EP 0 532 267 B 1

⑩ DE 692 22 729 T 2

⑤1 Int. Cl.<sup>6</sup>:  
G 02 B 5/18  
G 02 B 13/14

- ②1 Deutsches Aktenzeichen: 692 22 729.6  
⑧6 Europäisches Aktenzeichen: 92 308 126.9  
⑧6 Europäischer Anmeldetag: 8. 9. 92  
⑧7 Erstveröffentlichung durch das EPA: 17. 3. 93  
⑧7 Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung beim EPA: 15. 10. 97  
④7 Veröffentlichungstag im Patentblatt: 5. 3. 98

DE 692 22 729 T 2

③0 Unionspriorität:

757795 11. 09. 91 US

⑦3 Patentinhaber:

Hughes Aircraft Co., Los Angeles, Calif., US

⑦4 Vertreter:

Witte, Weller, Gahlert, Otten & Steil, 70178 Stuttgart

⑧4 Benannte Vertragsstaaten:

CH, DE, ES, FR, GB, IT, LI, NL

⑦2 Erfinder:

Chen, Chungte W., Irvine, California 92664, US

⑤4 Optisches System zur wiederholten Abbildung mit refraktiven und diffraktiven optischen Elementen

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patentamt inhaltlich nicht geprüft.

DE 692 22 729 T 2

## HINTERGRUND DER ERFINDUNG

### 1. Technisches Gebiet

Die vorliegende Erfindung betrifft optische Systeme zur wiederholten Abbildung, insbesondere ein optisches System zur wiederholten Abbildung mit einer Kombination von refraktiven und diffraktiven optischen Elementen zum Minimieren von Aberrationen.

### 2. Erläuterung

Bei vielen Arten optischer Systeme besteht ein dringendes Bedürfnis, optische Aberrationen zu korrigieren. Refraktive und reflektive Komponenten, bspw. Linsen, Spiegel und Prismen führen unvermeidlich zu zahlreichen Arten optischer Aberrationen. Diese umfassen z.B. Farbquerfehler und Farblängsfehler, Koma, sphärischen Chromatismus, chromatisches Koma, Astigmatismus, Feldkrümmung (Petzval), usw.

Je komplexer ein optisches System ist, desto mehr refraktive Elemente werden im System benötigt. Dies führt zu einer Zunahme von Aberrationen, die durch diese refraktiven Elemente hervorgerufen werden. Im Ergebnis werden dann weitere refraktive Elemente erforderlich, um diese Aberrationen zu korrigieren.

Dies betrifft z.B. viele optische Systeme, die optische Sensoren verwenden, die ihrerseits typischerweise eine optische Konfiguration mit wiederholter Abbildung erfordern. Eine optische Konfiguration zur wiederholten Abbildung in einem optischen Sensorsystem bietet eine Vielzahl von Vorteilen, bspw.

eine verbesserte Unterdrückung von außeraxialer Strahlung, eine hundertprozentige Kälteschirmung mit dem Kältestop in der Nähe des Detektormoduls und eine zugängliche Eingangspupille. Allgemein gesprochen besteht ein optisches System zur wiederholten Abbildung aus zwei Modulen: eine Objektivgruppe zum Fokussieren eines einfallenden Lichtstrahls auf eine Zwischenbildebene, und eine Ablenk-Gruppe, die dem Zwischenbild nachfolgt. Die Ablenk-Gruppe sendet das Licht dann auf den Detektor. Bei fokalen Bauarten von Systemen zur wiederholten Abbildung refokussiert die Ablenk-Gruppe das Licht in einer zweiten Bildebene am Detektor. Bei einem afokalen System kollimiert die Ablenk-Gruppe das Licht andererseits zum Zwecke der Beobachtung, wie dies üblicherweise auch bei Teleskop-Systemen geschieht.

Infolge der zusätzlichen optischen Elemente in einem optischen System zur wiederholten Abbildung wird eine Vielzahl von optischen Aberrationen eingeführt. Um z.B. eine gute Bildqualität in einem optischen System zur wiederholten Abbildung zu erhalten, müssen der Farblängsfehler sowohl der Objektivgruppe als auch der Ablenk-Gruppe individuell korrigiert werden. Obwohl im Prinzip der Längsfehler der Objektivgruppe durch die Ablenk-Gruppe beseitigt werden kann, beeinflusst die erforderliche zusätzliche negative Brennstärke in der hinteren Gruppe das Gleichgewicht der Aberrationen dritter Ordnung und erzeugt zusätzlich Aberrationen höherer Ordnung. Darüber hinaus müssen die sphärische Aberration und das Koma sowohl in der Objektivgruppe als auch in der Ablenk-Gruppe innerhalb jeder Gruppe teilweise korrigiert werden. Andernfalls kann der durch die sogenannte "Stop shift" (wesentliche Höhe ungleich null) induzierte Astigmatismus nicht ausgemittelt werden.

Aufgrund dieser Umstände sind refraktive optische Systeme zur wiederholten Abbildung im allgemeinen kompliziert und erfordern zahlreiche optische Elemente. In manchen Fällen werden Linsen mit asphärischen Oberflächen eingesetzt. Dies führt zu einer Vielzahl von Nachteilen. Die zusätzlichen Elemente erhöhen z.B. die Kosten des Systems. Insbesondere sind asphärische Oberflächen, die man verwendet, um einigen Arten von Aberrationen vorzubeugen, relativ teuer. Darüber hinaus tragen diese zusätzlichen optischen Elemente wesentlich zur Baugröße und zum Gewicht des gesamten Systems bei. Die zusätzlichen optischen Elemente beeinflussen darüber hinaus die Bildqualität und ergeben Verluste bei der Übertragung.

Aus diesen Gründen wäre es wünschenswert, ein optisches System zur wiederholten Abbildung zur Verfügung zu haben, bei dem die gesamte Anzahl der erforderlichen optischen Elemente vermindert ist. Zu diesem Zweck wäre es wünschenswert, optische Elemente zur Verfügung zu haben, die keine signifikanten Aberrationen einführen und die Aberrationen mit einer Mindestzahl von Komponenten korrigieren können. Weiterhin wäre es wünschenswert, ein optisches System zur wiederholten Abbildung zur Verfügung zu haben, das relativ preiswert, gleichzeitig aber hochwertig ist und eine hohe Bildqualität und niedrige Übertragungsverluste mit sich bringt. Darüber hinaus wäre es wünschenswert, ein optisches System zur wiederholten Abbildung zur Verfügung zu haben, das leicht ist und das auf relativ kompaktem Raum untergebracht werden kann.

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

Gemäß der vorliegenden Erfindung wird ein optisches System zur wiederholten Abbildung zur Verfügung gestellt, wie im nachstehenden Patentanspruch 1 spezifiziert, das eine Kombination von refraktiven und diffraktiven optischen Elementen verwendet. Das System schließt ein Objektiv-Linsengruppe zum Fokussieren eines einfallenden Lichtstrahls auf eine erste Bildebene ein. Eine Ablenk-Linsengruppe refokussiert den Lichtstrahl in einer zweiten Bildebene, nachdem dieser durch die erste Bildebene hindurchgetreten ist. Die Ablenk-Linsengruppe schließt ein diffraktives optisches Element zum Korrigieren von Aberrationen ein, die durch die Objektiv-Linsengruppe und die Ablenk-Linsengruppe hervorgerufen werden.

Das diffraktive optische Element ersetzt eine Anzahl von einzelnen optischen Elementen, die ansonsten notwendig wären, um Aberrationen zu korrigieren, wodurch die gesamte Anzahl optischer Elemente im System vermindert wird. Dies führt zu einer besseren Bildqualität, einem besseren Durchsatz und zu einem leichteren optischen System zur wiederholten Abbildung mit geringeren Abmessungen.

Im Dokument EP-A-441 206 ist ein Infrarot-Teleskop beschrieben, das ein optisches Element mit einer asphärischen optischen Oberfläche und eine binären optischen Gitter-Oberfläche verwendet.

KURZBESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

Verschiedene Vorteile der vorliegenden Erfindung werden für den Durchschnittsfachmann beim Lesen der folgenden Beschreibung unter Bezug auf die folgenden Zeichnungen deutlicher, in denen:

Fig. 1 ein Diagramm eines optischen Systems zur wiederholten Abbildung gemäß dem Stand der Technik ist;

Fig. 2 ein Diagramm eines optischen Systems zur wiederholten Abbildung gemäß der vorliegenden Erfindung ist, das ein diffraktives optisches Element verwendet;

Fig. 3 eine Reihe von H-tanU-Kurven darstellt, die die Funktion des in Fig. 1 dargestellten optischen Systems zur wiederholten Abbildung gemäß dem Stand der Technik zeigen;

Fig. 4 eine Reihe von H-tanU-Kurven darstellt, die die Funktion des in Fig. 2 dargestellten optischen Systems gemäß der vorliegenden Erfindung zeigen;

Fig. 5 eine Reihe von Funktionskurven des Modulations-Transfers für das in Fig. 1 dargestellte optische System zur wiederholten Abbildung gemäß dem Stand der Technik zeigt; und

Fig. 6 eine Reihe von Funktionskurven der Modulations-Transfers für das in Fig. 2 dargestellte optische System zur wiederholten Abbildung gemäß der vorliegenden Erfindung zeigt.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DES BEVORZUGTEN AUSFÜHRUNGSBEISPIELS

In Fig. 1 ist ein Diagramm eines optischen Systems 10 zur wiederholten Abbildung gemäß dem Stand der Technik gezeigt. Derartige Systeme zur wiederholten Abbildung werden in einer breiten Vielfalt von Anwendungen eingesetzt, insbesondere dann, wenn ein Detektor verwendet wird. Das in Fig. 1 gezeigte optische System zur wiederholten Abbildung ist ein infrarotes Abbildungssystem, wie es bei Nachtsichtsystemen eingesetzt werden kann. Das optische System 10 zur wiederholten Abbildung gemäß dem Stand der Technik empfängt kollimiertes Licht 12, das durch eine (nicht dargestellte) Eingangspupille eintritt, die die Grenzen 14 des einfallenden Lichtes definiert. Das Licht 12 trifft zunächst auf eine Silizium-Linse 16 und dann auf eine benachbarte Germanium-Linse 18, wobei diese beiden zusammen die Objektiv-Gruppe 20 bilden. Der Zweck der Objektiv-Gruppe ist es, das einfallende Licht 12 in einer Zwischenbildebene 22 zu fokussieren. Die Ablenk-Gruppe 24 empfängt das Licht 12, nachdem es durch die Zwischenbildebene 22 hindurchgetreten ist und refokussiert es auf einen Detektor 26. Die Ablenk-Gruppe besteht aus einer Silizium-Linse 28, die eine Konvex-Konvex-Linse ist und verwendet wird, um das Zwischenbild 22 abzulenken. Als nächstes besteht die Ablenk-Gruppe 24 aus einer Germanium-Linse 30, die eine Konkav-Konkav-Linse ist, wie man sie zum Korrigieren von Farbfehlern verwendet. Schließlich wird eine weitere Silizium-Linse 32 verwendet, die eine Konvex-Konkav-Linse ist, die eingesetzt wird, um das Licht nach dem Durchtritt durch die Germanium-Linse 30 zu fokussieren.

Es versteht sich, daß zum Erhalten einer guten Bildqualität in dem optischen System 10 zur wiederholten Abbildung der

Farblängsfehler sowohl der Objektiv-Gruppe 20 als auch der Ablenk-Gruppe 24 jeweils individuell gut korrigiert werden muß. Wenn z.B. der durch die Objektiv-Gruppe 20 eingeführte Farblängsfehler durch die Ablenk-Gruppe 24 entfernt wurde, stört die erforderliche zusätzliche negative Brechkraft des Germaniums (Flintglas) in der Ablenk-Gruppe das Gleichgewicht der Aberrationen dritter Ordnung und erzeugt zusätzlich Aberrationen höherer Ordnung. Dies ist der Grund, warum die Objektiv-Gruppe 20 und die Ablenk-Gruppe 24 jeweils Paare von Silizium- und Germanium-Linsen enthalten, weil diese Linsen zusammen einen Achromat bilden. Darüber hinaus ist einsehbar, daß die sphärische Aberration und das Koma sowohl der Objektiv-Gruppe 20 als auch der Ablenk-Gruppe 24 jeweils teilweise innerhalb jeder der Gruppen korrigiert werden müssen. Dies ist der Grund, warum dann, wenn dies nicht der Fall ist, der durch die sogenannte "Stop shift" (wesentliche Höhe ungleich null) induzierte Astigmatismus nicht ausgemittelt werden kann. Insgesamt ist das optische System 10 zur wiederholten Abbildung gemäß dem Stand der Technik daher relativ komplex und erforderlich eine Vielzahl optischer Elemente.

Darüber hinaus schließt das optische System 10 zur wiederholten Abbildung gemäß dem Stand der Technik einen Kältestop 24 ein, der wie eine Öffnung wirkt, um das Hintergrundrauschen im Infrarotbild zu vermindern. Typischerweise wird der Kältestop 34 am Fenster des (nicht dargestellten) Tauglases des Detektors angebracht. Der Infrarot-Detektor 26 empfängt dann das durch den Kältestop 34 hindurchtretende Licht. Die Verwendung von Silizium- und Germanium-Linsen in Kombination ist im Dokument US-A-4 380 363 dargestellt.



Fig. 2 zeigt ein Diagramm eines optischen Systems 36 zur wiederholten Abbildung gemäß der vorliegenden Erfindung. Das optische System 36 zur wiederholten Abbildung behält die funktionalen Eigenschaften des Systems 10 gemäß dem Stand der Technik bei, und zwar in wesentlich einfacherer optischer Form und mit verbesserter Bildqualität. Darüber hinaus wurde eine 40-prozentige Verminderung der Anzahl der Elemente erreicht. Dies führt zu wesentlichen Vorteilen hinsichtlich Gewicht und Kosten.

Ein wesentliches Merkmal des optischen Systems 36 zur wiederholten Abbildung ist die Tatsache, daß der primäre Farbquerfehler, der sekundäre Farbquerfehler und das Koma infolge des "Symmetrieprinzips" von selbst korrigiert werden. Insbesondere sind die Objektiv-Gruppe 38 und die Ablenk-Gruppe 40 symmetrisch relativ zur Zwischenbildebene. Dies führt zu einer Ausmittelung des primären Farbquerfehlers, des sekundären Farbquerfehlers und des Koma. Dies ergibt sich aufgrund der Verwendung von asphärischen Silizium-Linsen 42 und 44 vor und hinter der Zwischenbildebene 46.

Die vorteilhafte Verwendung des Symmetrieprinzips bei dieser Konfiguration wird dadurch ermöglicht, daß das optische System 36 zur wiederholten Abbildung ein refraktives optisches Element verwendet, um den Farblängsfehler des gesamten Systems zu korrigieren. Das diffraktive optische Element 48 umfaßt bei dem bevorzugten Ausführungsbeispiel ein binäres optisches Element. Das diffraktive optische Element 48 kann auch verwendet werden, um Farbfehler höherer Ordnung zu korrigieren, z.B. den Sphärochromatismus und das chromatische Koma. Darüber hinaus hat das diffraktive Element 48 eine positive optische Brenn-

kraft, die einen Teil zur Brennkraft des gesamten Systems beiträgt. Im Gegensatz dazu tragen herkömmliche Germanium (Flintglas)-Korrektur Elemente nicht zur Brennkraft des Systems bei. Als Ergebnis der Verwendung des diffraktiven optischen Elementes 48 zur Korrektur der Farbfehler werden die Eigen-Aberrationen aller Elemente im optischen System 36 wesentlich vermindert. Folglich wird die Korrektur der Aberration im gesamten System erheblich vereinfacht.

Für Durchschnittsfachleute ist erkennbar, daß diffraktive optische Elemente, wie binärische optische Elemente im allgemeinen, so eingesetzt werden können, daß sie sich in ähnlicher Weise wie refraktive optische Elemente verhalten. So kann z.B. die Vergrößerungs-Brennkraft auf dem binärischen optischen Element 48 mittels einer Zonenscheiben-Struktur codiert werden, deren effektive fokale Länge den Anforderungen des Systems genügt. Es versteht sich, daß auch eine prismatische Brennstärke verwendet werden kann, wenn dies notwendig ist.

Die Zonenscheiben-Struktur in dem binärischen optischen Element 48, die für die Erzeugung einer vergrößernden Brennstärke erforderlich ist, hat die Gestalt einer Fresnel-Zonenscheibe. Weitere Einzelheiten zu binären optischen Elementen finden sich in den Publikationen: G. Swanson und W. Veldkamp, "Infrared Applications of Diffractive Optical Elements", SPIE Proceedings, Volume 885, Paper No. 22, 1988; und D. Shafer und T. McHugh, "Binary Optics Design Surprises for the 1990s", SPIE Conference Proceedings, Orlando, Florida, März 1989. Durch diese Bezugnahme werden diese beiden Aufsätze zum Offenbarungsgehalt der vorliegenden Anmeldung gemacht. Wie in den beiden Schriften erörtert, erfordert ein Oberflächenprofil einer Fres-

nel-Zonenscheibe, die man für 100 Prozent Wirkungsgrad benötigt, gekrümmte, keilförmige Strukturen mit einer Höhe, oder Phasentiefe, von  $2 \mu$ .

An dieser Stelle muß bemerkt werden, daß diese Phasentiefe proportional zur Wellenlänge ist. Für infrarote Wellenlängen wird die Technologie zum Drehen einer Optik mittels Diamanten eingesetzt, um ein kontinuierlich gekrümmtes Phasenprofil zu erzeugen. Für Wellenlängen im sichtbaren Bereich existiert keine Technologie zum Herstellen eines kontinuierlich gekrümmten Phasenprofils. Folglich wird eine Approximation an das gewünschte Phasenprofil, nämlich das ideale, kontinuierliche Phasenprofil einer Fresnel-Zonenscheibe angenähert, indem man dieses in diskrete Phasenwerte unterteilt. Die Wirksamkeit der Diffraktion ist dabei eine Funktion der Anzahl der Phasenwerte. Man kann eine Wirksamkeit der Diffraktion von mehr als 90 Prozent erreichen, indem man z.B. die bei integrierten Schaltkreisen üblichen Herstellungstechnologien verwendet, so z.B. hochauflösende Lithographie, das Ausrichten von Masken oder das Ätzen mit reaktiven Ionen.

Die Zonenscheiben-Struktur des binären optischen Elementes 48 kann sehr allgemein ausgeführt sein, damit das binäre optische Element 22 Funktionen ausüben kann, wie z.B. eine Verminderung der Aberration oder eine Korrektur der Verzerrung. Die Zonenscheiben-Struktur kann durch jeden Satz von polynomen Formen mit oder ohne Symmetrie ausgedrückt werden. Die praktische Grenze wird dabei durch die kleinste Kenngröße für das binäre optische Element 48 gesetzt, die bei den heute zur Verfügung stehenden Technologien in der Größenordnung von 1 Micron ( $1 \mu\text{m}$ ) liegt. Mit der Möglichkeit, eine derartige Korrektur mittels

des binären optischen Elementes 48 zu erreichen, kann eine sehr gute Bildqualität in einem System erreicht werden, obwohl lediglich ein einziges binäres optisches Element 48 eingesetzt wird. An dieser Stelle muß festgehalten werden, daß das binäre optische Element 48, das eine Fresnel-Zonenscheibe verwendet, ein diffraktives optisches Element ist und nicht mit Fresnel-Linsen verwechselt werden darf, die refraktive Linsenelemente sind.

Die gewünschten optischen Eigenschaften des binären optischen Elements, das gemäß der vorliegenden Erfindung verwendet wird, kann hergeleitet werden, indem man herkömmliche Entwurfstechniken für Linsen einsetzt oder indem man wohlbekannte Programme zum Entwerfen von Linsen verwendet. Darüber hinaus ergeben sich aus dem oben zitierten Artikel von Swanson und Veldkamp weitere Einzelheiten über den Einsatz von Programmen zur Herstellung von Linsen, um Parameter im diffraktiven Phasenprofil der binären optischen Elemente zu optimieren. Kommerzielle Hersteller von binären optischen Elementen können eingesetzt werden, um die binären optischen Elemente entsprechend den abgeleiteten Formeln zu konstruieren. Die Firma Hughes Danbury Optical Systems, die ein Teil der Hughes Aircraft Company in Danbury, Connecticut, ist, kann als Beispiel für einen Hersteller genannt werden, der in der Lage ist, die Entwurfsformeln in arbeitsfähige binäre optische Elemente umzusetzen.

Die sphärische Aberration und das Koma sowohl der Objektiv-Gruppe 38 als auch der Ablenkgruppe 40 werden durch die Verwendung asphärischer Oberflächen bei den Linsen 42 und 44 korrigiert. Der Astigmatismus wird korrigiert, indem man Linsenelemente an den richtigen Positionen anordnet, und zwar mit

der entsprechenden Verteilung der Brennkraft. Die Feldkrümmung oder Petzval-Krümmung wird im Vergleich zu dem entsprechenden System 10 nach dem Stand der Technik erheblich vermindert, und zwar als Ergebnis der Verwendung des diffraktiven optischen Elementes 48 sowie einer wohl überlegten Glasauswahl.

Insoweit ist zu bemerken, daß eine Germanium-Linse 50 als letztes refraktives optisches Element im System 36 verwendet wird. Dies ist eine konvex-konkave Linse, die zur Verminderung der Feldkrümmung verwendet wird. Wenn man in dem System 10 nach dem Stand der Technik als letztes Element eine Germanium-Linse sowie die Linse 50 im System 36 verwenden würde, ergäbe sich ein wesentlicher Farbfehler. Der Grund dafür, Germanium zu verwenden, besteht darin, daß es einen hohen Refraktionsindex aufweist, der die Petzval-Krümmung vermindert. Andererseits führt es Farbfehler ein. Bei dem optischen System 36 zur wiederholten Abbildung gemäß der vorliegenden Erfindung kann die Germanium-Linse 50 jedoch in Kombination mit dem diffraktiven optischen Element 48 eingesetzt werden, um die Petzval-Krümmung zu vermindern, während andererseits die Farbfehler durch das diffraktive optische Element 48 korrigiert werden. Gemäß dem bevorzugten Ausführungsbeispiel wird das binäre optische Element 48 an der rückseitigen Oberfläche der Linse 50 angebracht.

In Fig. 3 sind H-tanU-Kurven gezeigt, die die Funktion eines typischen optischen Systems zur wiederholten Abbildung nach dem Stand der Technik darstellen, wie dasjenige, das in Fig. 1 gezeigt ist. Es versteht sich, daß die H-tanU-Kurven eine wichtige Möglichkeit sind, um das Leistungsvermögen eines optischen Systems zu bewerten. Man kann insbesondere durch Nachverfolgen einer Reihe von Strahlen von der Eingangspupille, bspw. der in

Fig. 1 gezeigten Eingangspupille 14, zu der Bildebene die Abweichung vom gewünschten Brennpunkt für jeden Strahl auftragen. Die "tangentialen Kurven" tragen damit die y-Position über die Eingangspupille entlang der x-Achse und die Abweichung ( $dy$ ) vom idealen Bildpunkt auf der y-Achse auf. In entsprechender Weise tragen die "sagittalen" Kurven 54 die x-Position der einfallenden Strahlen entlang der Eingangspupille auf der x-Achse sowie die Abweichung ( $dx$ ) vom idealen Bildpunkt auf der y-Achse auf. In einem idealen optischen System wäre daher die Abweichung null, und alle Kurven würden entlang der Linie 56, d.h.  $dy=0$ , in den tangentialen Kurven 52 und entlang der Linie 58, d.h.  $dx=0$ , in den sagittalen Kurven 54 liegen. Es gibt drei Sätze von tangentialen Kurven und drei Sätze von sagittalen Kurven. Die ersten Sätze von tangentialen Kurven 60 stellen H-tanU-Kurven bei 9 Grad Einfallswinkel dar. Entsprechend stellt der oberste Satz von sagittalen Kurven 62 ebenfalls Strahlen mit 9 Grad Einfallswinkel dar. In entsprechender Weise stellen der mittlere Satz von tangentialen Kurven 64 und der mittlere Satz von sagittalen Kurven 66 Strahlen dar, die bei 6,3265 Grad einfallen. Die untersten tangentialen Kurven 68 und die unteren sagittalen Kurven 70 stellen Strahlen dar, die bei null Grad Einfallswinkel einfallen. Bei all diesen Sätzen von Kurven gibt es drei mit 1, 2 und 3 bezeichnete Linien, die einfallendes Licht bei drei unterschiedlichen Wellenlängen darstellen. Bei den speziell in Fig. 3 dargestellten Daten wurde die Kurve eins z.B. mit Licht von einer Wellenlänge von  $3,8 \mu\text{m}$  gemessen, Kurven zwei hat eine Wellenlänge von  $3,6 \mu\text{m}$  und Kurve drei hat eine Wellenlänge von  $4,2 \mu\text{m}$ .

Zusammenfassend kann man daher sehen, daß die tangentialen Kurven 52 und die sagittalen Kurven 54 ein Maß für die geome-

trische Aberration in einem Bild darstellen. Hinzu kommt, daß die Differenzen zwischen den drei Wellenlängen-Kurven 1, 2 und 3 einen Hinweis für die chromatische Aberration (Farbfehler) des optischen Systems geben. Allgemein gesprochen kann man daher erkennen, daß die geometrische und die chromatische Aberration zu den Rändern der Eingangspupille hin zunimmt und im Bereich der mittleren Strahlen ein Minimum haben.

In Fig. 4 sind H-tanU-Kurven für das optische System 36 zur wiederholten Abbildung gemäß der vorliegenden Erfindung gezeigt. Fig. 4 zeigt eine Reihe von tangentialen Kurven 72 und sagittalen Kurven 74 bei übereinstimmenden Einfallswinkeln und denselben Wellenlängen wie bei den Kurven in Fig. 3. Man kann erkennen, daß in beiden Fällen die Werte für  $dy$  und die Werte für  $dx$  wesentlich niedriger sind als bei den in Fig. 3 dargestellten Kurven für ein optisches System zur wiederholten Abbildung nach dem Stand der Technik. Dies deutet auf eine überlegene Funktionsfähigkeit mit geringerer geometrischer und chromatischer Aberration hin.

Ein anderes Maß für die Leistungsfähigkeit optischer Systeme ist die Funktionskurve für den Modulationstransfer. In Fig. 5 sind Funktionskurven für den Modulationstransfer für das in Fig. 1 gezeigte System nach dem Stand der Technik aufgetragen. Die räumliche Frequenz ist entlang der x-Achse aufgetragen und die Modulation ist entlang der y-Achse aufgetragen. Generell ausgedrückt sind die Funktionskurven für den Modulationstransfer ein Maß für die Reduzierung des Kontrastes zwischen hellen und dunklen Bereichen in einem Bild, wenn die räumliche Frequenz ansteigt. Die räumliche Frequenz ist entlang der x-Achse in Hz/mm-Einheiten aufgetragen, was anzeigt, wieviele

dunkle Balken in einem hellen und in einem dunklen Gitter pro Millimeter auftreten. Die entlang der y-Achse aufgetragene Modulation wird durch die Intensität der hellen Bereiche oder Balken abzüglich der Intensität der dunklen Balken, dividiert durch die Intensität der hellen plus der Intensität der dunklen Balken berechnet.

Die Funktionskurven 76 für den Modulationstransfer in Fig. 5 zeigen fünf unterschiedliche Kurven, die bei fünf unterschiedlichen Erhebungen und Zielrichtungen gemessen wurden. Die durchgezogene Kurve 80 stellt einen entlang der Achse verlaufenden Strahl dar, der eine vertikale Ausrichtung hat. Dies bedeutet, daß die hellen und die dunklen Balken in vertikaler Richtung orientiert sind. Die zweite, Striche und Punkte umfassende Kurve 82 wurde bei 6,3 Grad Erhebung und null Grad Azimut gemessen, wobei das Ziel vertikal ausgerichtet war. Die dritte Kurve 84, die durch eine Reihe von langen Strichen dargestellt ist, wurde mit dem einfallenden Licht bei 6,3 Grad Erhebung gemessen, wobei das Ziel horizontal ausgerichtet war. Die vierte Kurve 86, bestehend aus Punkten und langen Strichen wurde mit einem einfallenden Strahl von 8,1 Grad Erhebung gemessen, wobei das Ziel vertikal gerichtet war. Die letzte Kurve 88 schließlich, die aus kurzen Strichen besteht, wurde mit einem einfallenden Strahl bei 8,1 Grad Erhebung gemessen, wobei das Ziel horizontal ausgerichtet war. Die Charakteristik einer Wellenlänge des bei diesen Messungen verwendeten Lichtes zeigt, daß ungleichförmige Gewichtungsfaktoren für unterschiedliche Wellenlängen bei der MTF-Berechnung angewendet werden. Allgemein ausgedrückt kann man erkennen, daß das System 10 nach dem Stand der Technik zu Funktionskurven für den Modulationstransfer führt, bei denen die Modulation von 1,0 bei der räumlichen Fre-



quenz null auf 0,5 bei einer räumlichen Frequenz von 50 abfällt.

Die Funktionskurven 90 für den Modulationstransfer für das optische System 36 mit wiederholter Abbildung gemäß der vorliegenden Erfindung sind in Fig. 6 gezeigt. Diese Messungen wurden unter denselben Bedingungen wie in Fig. 5 aufgenommen, und die Lichtkurven zeigen dieselben außeraxialen Winkel wie die in Fig. 5 gezeigten. Wie man erkennt, zeigen alle Kurven innerhalb der Funktionskurven 90 für den Modulationstransfer eine höhere Modulation über den gesamten Bereich bis zur maximalen räumlichen Frequenz von 40. Insgesamt zeigen diese Kurven, daß das optische System 96 zur wiederholten Abbildung ein Bild von höherer Qualität erzeugt, insbesondere für feine Details wie solche, die eine räumliche Frequenz von bis zu 40 Hz haben.

Aus dem Vorstehenden kann man erkennen, daß die Verwendung des binären optischen Elementes 40 in einem optischen System zur wiederholten Abbildung die Flexibilität in der Konstruktion des Systems erheblich vergrößert, indem eine optische Brennkraft sowie eine Korrektur der Aberration zur Verfügung gestellt wird, ohne Aberration einzubringen. Das System ergibt ferner ein optisches System zur wiederholten Abbildung mit einer geringeren Gesamtanzahl von optischen Elementen. Dies ergibt wiederum eine Reduzierung der Aberrationen, eine Reduzierung der Übertragungsverluste und eine Erhöhung in Bildqualität. Als weiteres Ergebnis kann das System zu niedrigeren Kosten konstruiert werden; es wiegt weniger und nimmt weniger Raum ein. Weiterhin ist einzusehen, daß das System innerhalb von Systemen eingesetzt werden kann, die fokal ausgebildet sind, wie in den bevorzugten Ausführungsbeispielen dargestellt

19.10.97

17

wurde, oder aber in afokalen Systemen, wie in gewissen Teleskop-Systemen. Darüber hinaus kann das System innerhalb einer großen Bandbreite von Spektralbereichen eingesetzt werden, von Ultraviolett bis hin zum Infrarot.

Patentansprüche

1.   Optisches System (36) mit:
  - einer ersten Linsengruppe (38) zum Fokussieren eines einfallenden Lichtstrahls (46) auf eine erste Bildebene (46);
  - einer zweiten Linsengruppe (40) zum Refokussieren des Lichtstrahls in einer zweiten Bildebene (26) nach dessen Durchgang durch die erste Bildebene ((46));
  - wobei die erste und die zweite Linsengruppe (38, 40) jeweils asphärische, refraktive Linsen enthalten, die so angeordnet sind, daß sie primäre Farbquerfehler, sekundäre Farbquerfehler sowie Koma ausgleichen, gekennzeichnet durch
  - ein diffraktives optisches Element (48) im Pfad des Lichtstrahls zum Korrigieren von Farblängsfehlern.
2.   Optisches System nach Anspruch 1, das ferner einen Detektor (26) umfaßt, der den Lichtstrahl empfängt, nachdem dieser durch die zweite Linsengruppe refraktiert wurde.
3.   Optisches System nach Anspruch 1 oder 2, bei dem das diffraktive optische Element ein binäres optisches Element umfaßt.

4. Optisches System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die erste und die zweite Linsengruppe jeweils Silizium-Linsen (42, 44) umfassen.
5. Optisches System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die zweite Linsengruppe Silizium- und Germanium-Linsen (44, 50) umfaßt.
6. Optisches System (36) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem
  - die erste Linsengruppe (38) eine Objektiv-Linsengruppe zum Fokussieren eines einfallenden Lichtstrahls aus infrarotem Licht auf die erste Bildebene (46) ist;
  - die zweite Linsengruppe eine Ablenk-Linsengruppe zum Refokussieren des Lichtstrahls in der zweiten Bildebene (26) nach dessen Durchgang durch die erste Bildebene ist;
  - die Objektiv- und die Ablenk-Linsengruppe jeweils asphärische, refraktive Silizium-Linsen enthalten; und
  - das diffraktive optische Element eine Platte mit einer Fresnel-Zone umfaßt, die an einer Linse in der Ablenk-Linsengruppe befestigt ist.

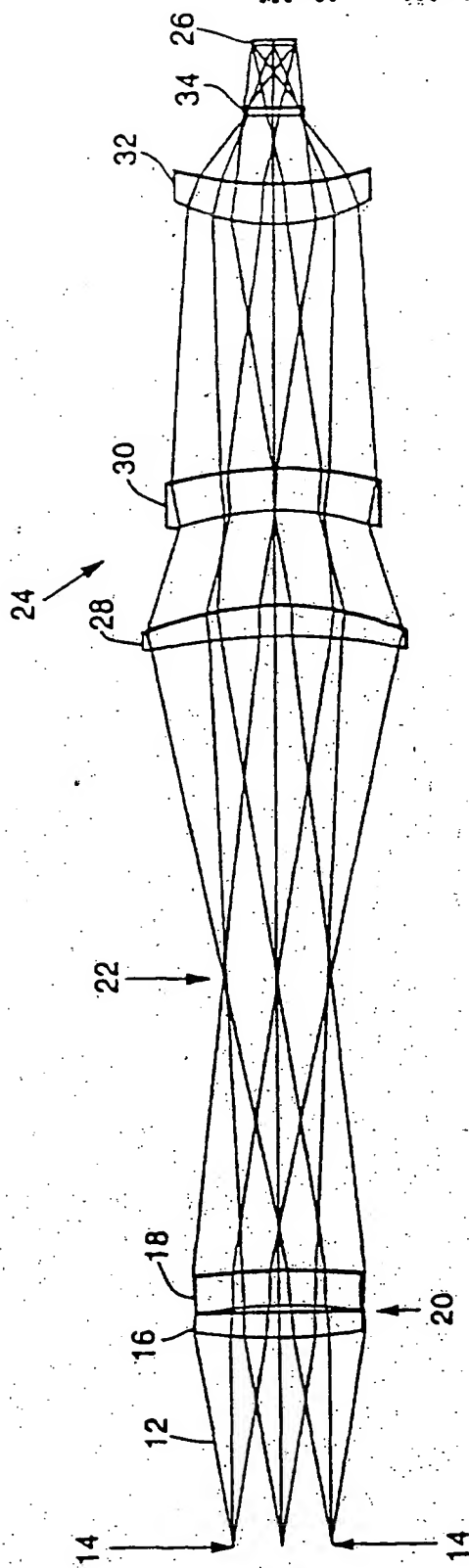


FIG. 1.  
(STAND DER TECHNIK)

10.10.97

2/6

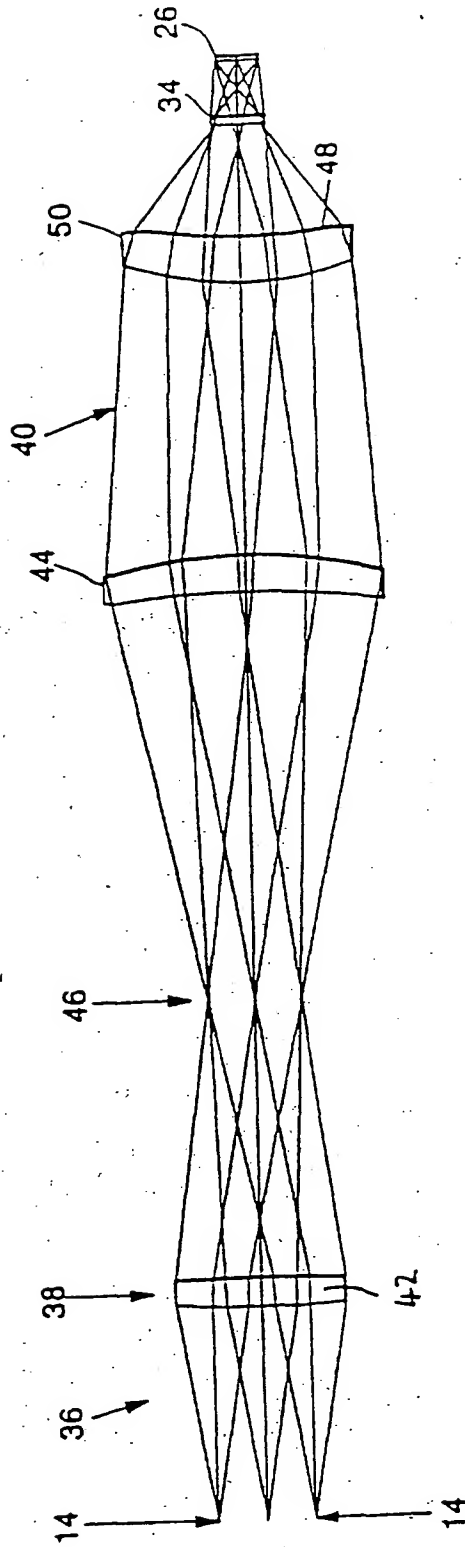


FIG. 2.

18.10.97

3/6

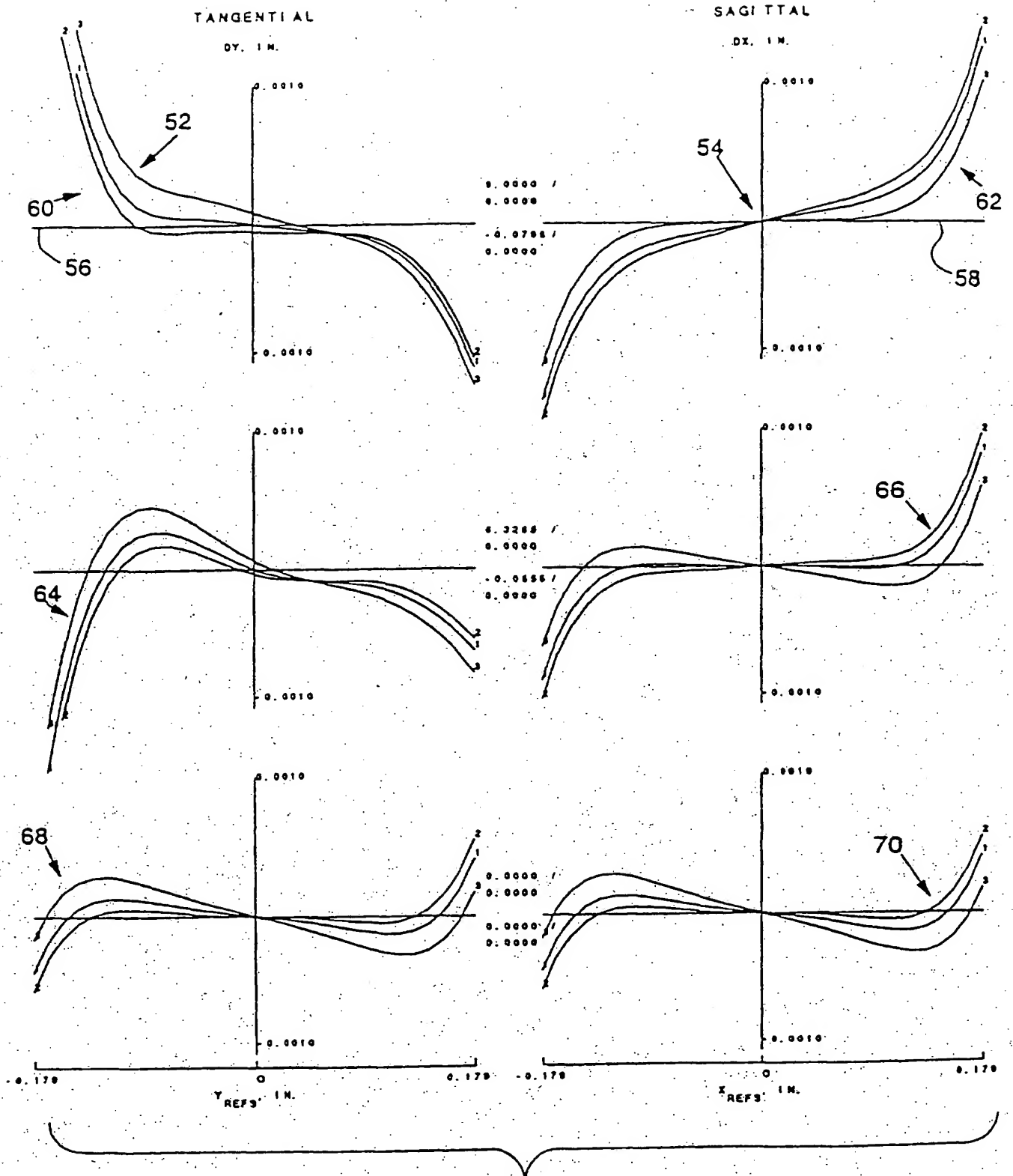


FIG. 3.

(STAND DER TECHNIK)

18.10.97  
476

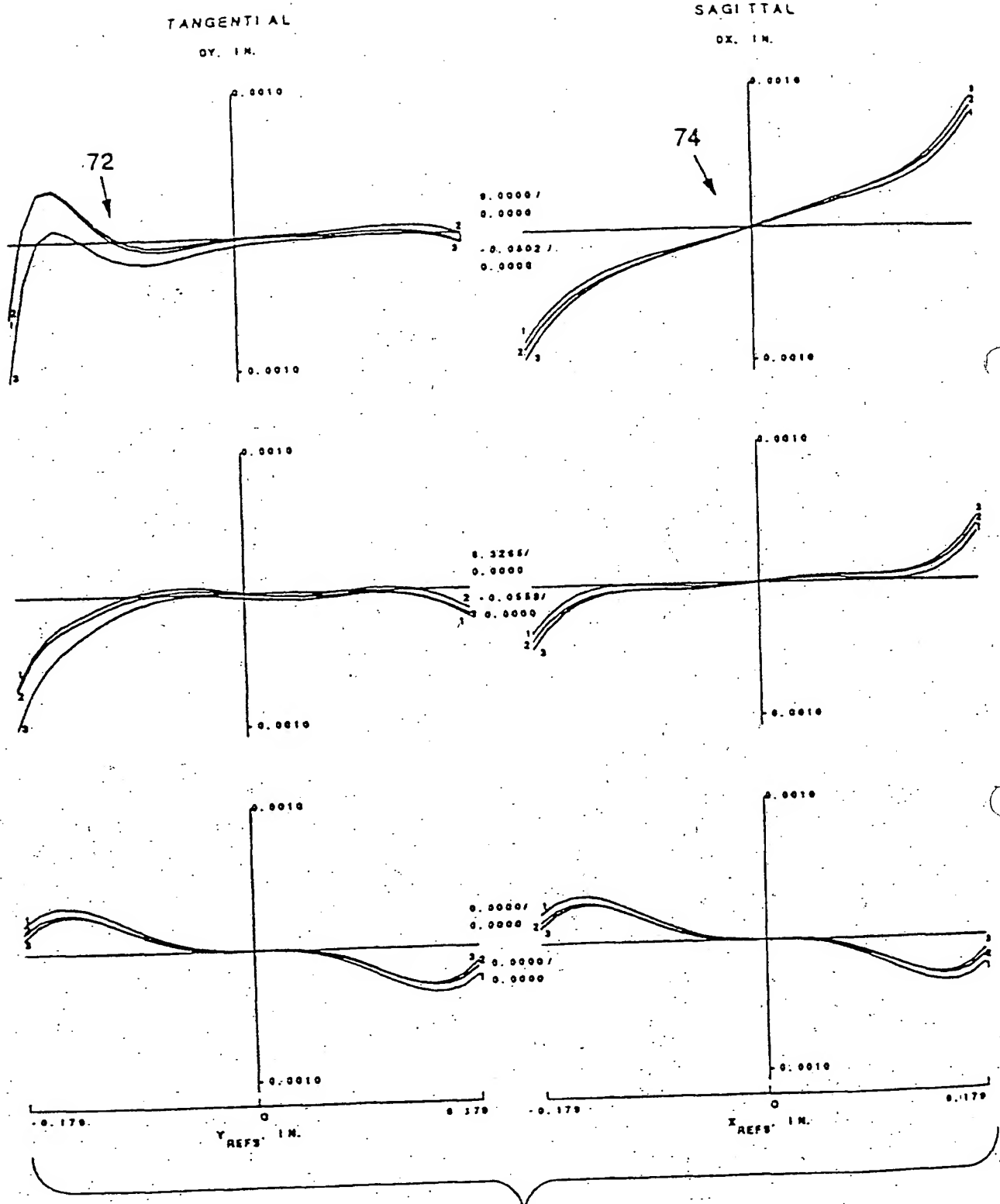


FIG. 4.



18.10.97

5/6

